

廖亦龙, 柳武革, 王丰, 等. 晚籼杂交稻 LAI、SPAD 和 LTR 的动态变化及对产量性状的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(6): 936-948.  
LIAO Yilong, LIU Wuge, WANG Feng, et al. Dynamic changes of LAI, SPAD and LTR of late-season *indica* hybrid rice and their effects on grain yield traits[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(6): 936-948.

# 晚籼杂交稻 LAI、SPAD 和 LTR 的动态变化 及对产量性状的影响

廖亦龙<sup>1,2</sup>, 柳武革<sup>1,2</sup>, 王丰<sup>1,2</sup>, 刘迪林<sup>1,2</sup>, 孔乐<sup>1,2</sup>, 李金华<sup>1,2</sup>, 付崇允<sup>1,2</sup>,  
曾学勤<sup>1,2</sup>, 朱满山<sup>1,2</sup>, 马晓智<sup>1</sup>, 霍兴<sup>1</sup>

(1 广东省农业科学院 水稻研究所/广东省水稻育种新技术重点实验室/广东省水稻工程实验室, 广东 广州 510640;  
2 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**【目的】研究晚籼杂交稻单株穗数、叶面积指数 (Leaf area index, LAI)、叶片 SPAD 和透光率 (Light transmittance rate, LTR) 等指标的动态变化, 进一步明确它们之间的相互关系及其对杂交稻产量和产量性状的影响, 为杂交水稻育种和生产实践提供理论指导。【方法】以华南地区广泛应用的 5 个三系不育系和 6 个恢复系配置杂交组合, 于 2021 年晚季在广州进行 27 个杂交组合的随机区组试验, 分析杂种光合参数的动态变化规律以及不同发育阶段各光合参数对产量及产量性状的影响及相关性。【结果】杂种茎蘖数自移栽后直线上升, 于移栽后 25 d 达分蘖高峰, 始穗期 (移栽后 60 d) 进入平稳期; 杂种 LAI 自移栽后快速上升, 于幼穗分化后期 (移栽后 50 d) 后达最高值, 之后进入回落期; 叶片 SPAD 自移栽后逐步走低, 生长发育前期组合间叶片 SPAD 差异不明显, 进入灌浆结实期后存在显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 差异; 杂种群体 LTR 随发育进程呈逐步下降趋势。相关分析表明: 分蘖盛期前 (移栽后 10~20 d) 以及始穗期至灌浆期 (移栽后 60~76 d) 的单株茎蘖数与杂种产量呈极显著正相关, 增产作用主要通过增加单株实粒数实现; 分蘖盛期至幼穗分化后期 (移栽后 25~50 d) 的茎蘖数过多, 增加了杂种群体的无效分蘖, 造成杂种结实率下降和产量显著降低; 分蘖前期 (移栽后 20 d) 和始穗期 (移栽后 60 d) 杂种 LAI 与产量呈极显著和显著正相关, 相关系数分别为 0.296 和 0.255, 增产作用主要通过提高单株实粒数和千粒质量实现; 灌浆期 (移栽后 76 d) 的 LAI 与产量呈极显著负相关, 相关系数为-0.312; 生育前期 (移栽后 15~50 d) 杂种 SPAD 对产量具有显著或极显著增产效应, 而灌浆结实期 (移栽后 76~90 d) 的 SPAD 则造成极显著减产; 杂种群体 LTR 与产量呈极显著负相关, 分蘖前期 (移栽后 20 d) 和幼穗分化前期 (移栽后 38 d) 的 LTR 与产量的相关系数分别为-0.282 和-0.384。【结论】‘天丰 A’ ‘五丰 A’ ‘广恢 998’ 和 ‘广恢 308’ 组合的前期分蘖力强, 茎蘖数多, 叶面积系数大, 早生快发性好; ‘扬泰 A’ ‘广恢 998’ 等组合前期 LTR 较低、后期较高, 有利于植株光合作用和产量提高。在不同生长发育阶段, 光合参数通过影响杂种的不同产量性状, 实现对杂种产量的影响。通过光合参数与杂种产量回归方程的拟合, 能较好地对接杂交水稻早期产量进行预测。

**关键词:** 杂交稻; 动态变化; 叶面积指数; SPAD; 单株茎蘖数; 透光率; 产量性状

中图分类号: S511.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)06-0936-13

## Dynamic changes of LAI, SPAD and LTR of late-season *indica* hybrid rice and their effects on grain yield traits

收稿日期: 2023-04-13 网络首发时间: 2023-10-20 08:49:21

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20231019.1649.002>

作者简介: 廖亦龙, 研究员, 博士, 主要从事水稻杂种优势利用研究, E-mail: [liaoYilong8888@163.com](mailto:liaoYilong8888@163.com); 通信作者: 王丰, 研究员, 博士, 主要从事水稻杂种优势利用研究, E-mail: [fwang1631@163.com](mailto:fwang1631@163.com)

基金项目: 岭南现代农业实验室科研项目 (NT2021001); 广东省重点领域研发计划 (2018B020206002); 广东省基础与应用基础研究基金 (2019A1515011903); 广东省科技计划 (2017A070702006); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-01); 广东省重点实验室运行经费 (2020B1212060047)

LIAO Yilong<sup>1,2</sup>✉, LIU Wuge<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>✉, LIU Dilin<sup>1,2</sup>, KONG Le<sup>1,2</sup>, LI Jinhua<sup>1,2</sup>, FU Chongyun<sup>1,2</sup>,  
ZENG Xueqin<sup>1,2</sup>, ZHU Manshan<sup>1,2</sup>, MA Xiaozhi<sup>1</sup>, HUO Xing<sup>1</sup>

(1 Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Key Laboratory of New Technology in Rice Breeding/Guangdong Rice Engineering Laboratory, Guangzhou 510640, China; 2 Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** **【Objective】** The study aims to analyze the dynamic changes of panicles per plant, leaf area index (LAI), leaf SPAD, and light transmittance rate (LTR) in late-season *indica* hybrid rice, further clarify their interrelationships and their effects on yield and yield-related traits, and provide a theoretical guidance for hybrid rice breeding and production practice. **【Method】** Five three-line sterile lines and six restorer lines, which are widely used in South China, were used as hybrid combination parents, and a random block experiment of 27 hybrid combinations was conducted in Guangzhou in the late season of 2021. The dynamic changes of photosynthetic parameters, the effects of photosynthetic parameters at different growth and development stages on yield and yield-related traits, and their dynamic correlation were studied. **【Result】** The number of hybrid tillers increased linearly after transplantation, peaked on 25 d after transplantation, and entered a stable period at the initial heading stage (60 d after transplanting). The hybrid LAI rapidly increased after transplanting, reaching its highest value at the late stage of spike differentiation (50 d after transplanting), and then entered a decline period. The leaf SPAD of hybrids gradually decreased after transplantation, and there was no significant difference at the early growth and development stage, while there was significant ( $P < 0.05$ ) or extremely significant ( $P < 0.01$ ) differences between the SPAD at the grain-filling stage. The LTR of hybrid populations decreased gradually with the development process. The correlation analysis showed that there was a highly significant positive correlation between the number of tillers per plant and hybrid yield at peak tillering stage (10–20 d after transplanting), initial heading stage (60 d after transplanting), and grain-filling stage (76 d after transplanting). The yield increase effect was mainly achieved by increasing the number of filled grains per plant. The excessive number of tillers during peak tillering stage to the late stage of spike differentiation (25–50 d after transplanting) increased the ineffective tillers, resulted in a decrease in hybrid seed setting rate and a significant decrease in yield. The hybrid LAI value at tiling stage (20 d after transplanting) and initial heading stage (60 d after transplanting) showed a significant or extremely significant positive correlation with yield, with the correlation coefficients of 0.296 and 0.255, respectively. The yield increase effect were mainly achieved by increasing the number of filled grains per plant and the weight of 1000-grain. The LAI value at grain-filling stage (76 d after transplanting) showed a highly significant negative correlation with yield with the correlation coefficient of  $-0.312$ . The SPAD of hybrids at the early stage of growth (15–50 d after transplanting) had a significant or extremely significant increase in yield, while the SPAD value in the later stage (76–90 d after transplanting) caused a very significant decrease in yield. The LTR of hybrid populations showed extremely significant negative correlation with their yield, the correlation coefficients between LTR and yield at tillering stage (20 d after transplanting), and early stage of spike differentiation (38 d after transplanting) were  $-0.282$  and  $-0.384$ , respectively. **【Conclusion】** The combinations derived from ‘Tianfeng-A’, ‘Wufeng-A’, ‘R998’ and ‘R308’ have strong early tillering ability, a large number of stem tillers, a large LAI, and good early growth and rapid development. The combinations of ‘Yangtai-A’ and ‘R998’ show a lower LTR in the early growing stage and a higher LTR in the later stage, which is much beneficial for plant photosynthesis and yield improvement. The yield of hybrids is affected by photosynthetic parameters at different stages of growth and development, through influencing the different yield traits. By fitting the regression equation between photosynthetic parameters and hybrid yield, the yield of hybrids can be well predicted at early growing stage.

**Key words:** Hybrid rice; Dynamic change; Leaf area index (LAI); SPAD; Tillers per plant (TPP); Light transmittance rate (LTR); Yield trait

光合作用是绿色植物利用自然界光能将  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  合成有机物、释放  $\text{O}_2$  的过程。没有植物的光合作用就不可能有人类的生存和社会的进步<sup>[1]</sup>。光合作用产生的碳水化合物最终形成生物量和作物产量,植物干质量的 90%~95% 来自其光合产物,光合产物是作物产量形成的物质基础和前提条件<sup>[2]</sup>。水稻是世界上最重要的粮食作物之一,全球超过一半人口以稻米为主食。我国水稻种植面积达 3000 万公顷,约占全世界种植面积的 20%,总产量占全世界产量的 40% 左右。水稻是我国乃至世界粮食安全至关重要的战略资源之一<sup>[3]</sup>。水稻产量的三分之二来自开花后叶片光合产物。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,负责吸收、转换和传递光能。在一定的范围内,叶片的叶绿素含量与光合速率呈正相关,不同品种间光合速率及叶片叶绿素含量存在显著差异<sup>[4-5]</sup>;叶片 SPAD 与叶绿素含量显著正相关,能精确表达植物叶绿素含量<sup>[6-10]</sup>。用 SPAD 测量仪检测植物叶绿素含量具有简便快捷、精准无损、安全高效的特点<sup>[11-12]</sup>。因此,近年来以 SPAD 为指标大量开展了作物氮素营养诊断和管控<sup>[13-16]</sup>、产量预测和提高<sup>[17-21]</sup>、品质评估和改良<sup>[22-25]</sup>等方面的研究。叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 指单位面积土地上植物叶片总面积占土地面积的倍数。叶面积越大,植物接受太阳光的面积就越大,光能的吸收和有机物质的合成就越多。在一定的太阳能下,水稻有一个获得最大干物质量的最适宜的叶面积指数。提高叶面积指数,改进群体受光态势是植物高产的关键。随着栽插密度的增加,叶面积指数随之增大,作物生长速率和群体光能利用率快速提高<sup>[26-27]</sup>;除了栽插密度外,植物本身的分蘖能力也是影响叶面积指数的一个重要因素。在同等栽插密度和管理条件下,分蘖越多,茎蘖数就越多,叶面积指数也就越大,作物产量相应提高<sup>[28-30]</sup>。但是,穗多叶多的群体内,光分布也可能受到影响,密度过大,叶片过多,群体下部透光率 (Light transmittance rate, LTR) 降低,下部叶片光合作用降低,呼吸作用增强,不仅不利于物质生产,还易消耗营养物质。因此,保持群体内各茎蘖穗层透光率达到均衡适宜状态,对获得群体高产非常重要。迄今为止,对单个或少数几个品种的某一光合指标或参数的研究较多,而对多个品种 (品系) 的多个光合指标及其关联性的研究较少。本文利用生产上大面积推广应用的三系不育系和恢复系配置杂交组合,并对其全生育期的叶面积指数、SPAD、透光率等光合指标进行动态分析,揭示其动态变化特征和规律、

相互间的关联性以及对杂交水稻产量及产量性状的调控规律,为杂交水稻生产和进一步的育种实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验设计

选用华南地区育成并在生产上大面积应用的 5 个籼稻三系不育系 ‘天丰 A’ ‘五丰 A’ ‘荣丰 A’ ‘泰丰 A’ 以及新育成的优质长粒型不育系 ‘扬泰 A’ 为母本,6 个籼稻恢复系 ‘广恢 998’ ‘广恢 122’ ‘广恢 308’ ‘华占’ ‘桂 99’ 和 ‘明恢 63’ 为父本,配置 27 个杂交稻组合作为供试材料。

试验于 2021 年晚季在广东省农业科学院广州大丰试验基地进行,设计随机区组试验,每区组 3 次重复。7 月 24 日播种,8 月 10 日插秧,每区栽插 12 行,每行 10 株,株行距为 16.7 cm × 20.0 cm,单株种植,统一采用普通的大田肥水管理。水稻成熟后,调查各杂交稻组合及亲本的生育期并各取 10 株正常单株进行室内考种。考察单株穗数、单株实粒数、结实率、千粒质量和单株实收产量。

### 1.2 单株茎蘖数动态调查

移栽后 10、15、20、25、30、35、43、50 和 60 d 调查 10 株水稻的单株分蘖数,并记录水稻所处的主要生长发育阶段,如分蘖期、幼穗分化期、抽穗期和成熟期等。水稻不同生育时期的划分参照丁颖<sup>[31]</sup>的标准。

### 1.3 叶面积指数和透光率测定

移栽后 15、20、30、43、50、60、76 和 90 d,选择生长发育进程一致的 10 株水稻单株,利用美国生产的 LI-COR LAI-2200C 型植物冠层分析仪在田间活体无损测定杂种群体及其相应亲本群体的叶面积指数。移栽后 20、38 和 68 d,在水稻生长的前、中、后期共测定 3 次群体透光率。此外,根据各杂种组合各生育期的实测数据,利用插值法估算出其移栽后 30、43、60 和 76 d 的透光率。

### 1.4 叶片 SPAD 测定

移栽后 15、20、30、43、50、60 和 76 d 利用日式叶绿素仪 SPAD-502 测定叶片 SPAD。分别选取 10 株生长发育进程一致的单株,选定单茎顶部三叶的相同部位,即每张叶片的中部及上、下 3 cm 处,共选 3 个点进行无损测量,取平均值。

### 1.5 数据分析方法

利用 DPS\_7.05 软件对试验数据进行方差分析,利用 Duncan's 新复极差法进行多重比较,利用

SPSS\_27.0 软件进行相关性分析及线性拟合, 采用 OriginPro 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同亲本杂种后代光合参数的动态变化

**2.1.1 分蘖** 图 1 显示, 移栽后 20 d 所有杂交组合的茎蘖数差异不显著。每穴茎蘖数自移栽后快速上升, 并于 25 d 时达到峰值, 此时为杂种分蘖盛期。但 20 d 处有 1 个回落低谷, 主要是因为分蘖盛期遇连续阴雨天气, 分蘖加速衰亡。此后随着生育进程推进, 小分蘖不断衰亡, 茎蘖数逐渐减少, 至始穗期 (移栽后 60 d) 开始进入平稳状态。从几个不育系配置的杂交组合来看, 分蘖盛期 (移栽后 20 d)

前, ‘天丰 A’ ‘五丰 A’ 组合的分蘖力更强, 单株茎蘖数多。其次是 ‘荣丰 A’ ‘泰丰 A’ 组合 (图 1A)。几个恢复系配置的杂交组合中, ‘广恢 998’ ‘广恢 308’ 组合在分蘖盛期前的分蘖速率最快、茎蘖数最多, 而且后期也保持较多的茎蘖数; 说明这 2 个恢复系配置的组合具有很好的早生快发性。‘华占’ ‘广恢 122’ 组合前期分蘖较慢, 但后期茎蘖数和单株有效分蘖数较多, 与前期研究结果<sup>[32]</sup>一致。‘明恢 63’ 组合前期分蘖速率中等, 从分蘖盛期至幼穗分化后期 (移栽后 30~50 d), 分蘖速度明显高于其他组合, 但后期茎蘖数下降较快, 说明无效分蘖较多, 成穗率低 (图 1B)。

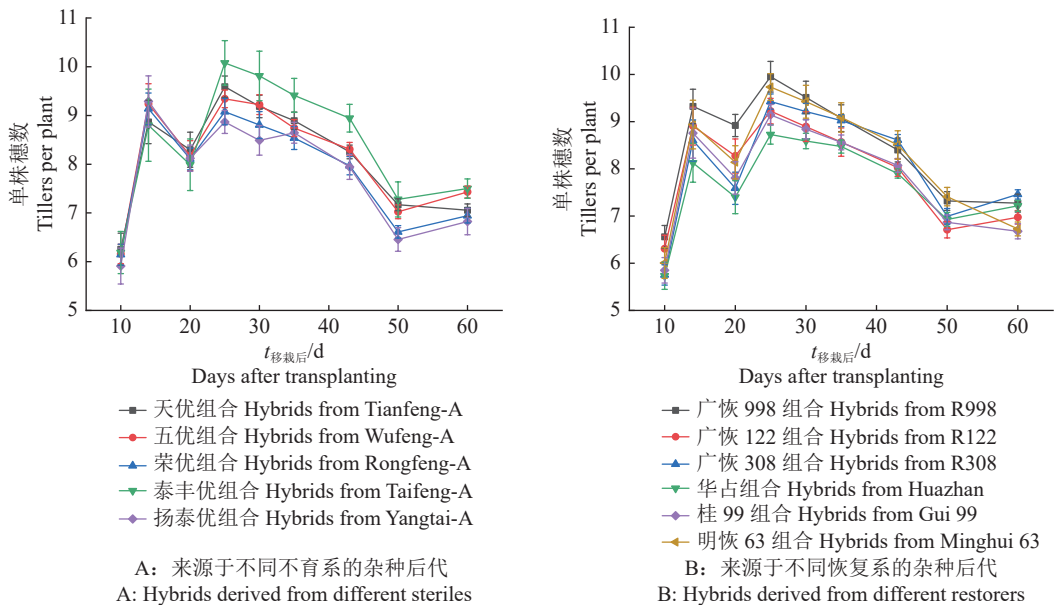


图 1 不同亲本杂种后代群体单株茎蘖数的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of tillers per plant of hybrid populations derived from different parents

**2.1.2 叶面积指数** 如表 1 所示, 各组合的叶面积指数自移栽后快速增长, 并于幼穗分化后期 (移栽后 50 d) 达到最高 (‘广恢 122’ 组合于始穗期达到最高), 之后进入回落期。分蘖前期 (移栽后 15 d) 各组合叶面积指数差异不显著。分蘖盛期前 ‘广恢 122’ 组合的叶面积指数偏低, 这一结果与 ‘广恢 122’ 恢复系本身叶面积指数较低、分蘖较慢有关<sup>[32]</sup>。叶面积指数达到 1.0 时, 标志水稻群体基本覆盖整个稻田, 群体漏光减少。表 1 显示, 所有组合的叶面积指数均在移栽后 20 d 之前达到 1.0。‘明恢 63’ 和天丰优组合达到 1.0 的时间略早, 而 ‘广恢 122’ 组合略迟。从叶面积指数的动态变化过程来看, 由于亲本 ‘明恢 63’ 叶片宽大, 其组合的叶面积指数也相对较大, 其次是 ‘天丰 A’ ‘扬

泰 A’ ‘五丰 A’ ‘广恢 998’ 和 ‘广恢 308’ 组合。‘华占’ 组合的叶面积指数相对较低。

**2.1.3 SPAD** 不同杂交组合 SPAD 的多重比较结果见表 2, 各组合 SPAD 从移栽后逐步走低, 即移栽后的 SPAD 为最大值, 此后逐渐缓慢下降。植株分蘖后期至始穗期 (移栽后 30~60 d), 叶片 SPAD 相对稳定。此后, 随着水稻发育, SPAD 进入快速下降期。另外一个比较明显的特点是, 杂交稻生长发育前期, 即幼穗分化前期 (移栽后 50 d), 除长生生育期的 ‘明恢 63’ 和 ‘桂 99’ 组合的 SPAD 略低外, 组合间叶片 SPAD 差异不显著。而在杂交稻生长发育后期的抽穗扬花期至灌浆结实期 (移栽后 76~90 d), 各组合 SPAD 差异显著。前期叶片 SPAD 较低的 ‘明恢 63’ 组合, 后期则显著高于其他杂交组



表 1 不同亲本配置杂交组合在不同移栽后天数的叶面积指数动态变化<sup>1)</sup>

Table 1 Dynamic changes of leaf area indexes of hybrids derived from different parents on different days after transplanting

亲本 Parent	15 d	20 d	30 d	43 d	50 d	60 d	76 d	90 d
天丰A Tianfeng-A	0.72±0.28a	1.27±0.20a	3.24±0.51b	4.85±0.70ab	5.52±0.75ab	5.37±0.64a	3.78±0.72ab	3.15±0.54ab
五丰A Wufeng-A	0.76±0.24a	1.24±0.18ab	3.19±0.58b	4.74±0.70ab	5.48±0.73ab	5.15±0.72abc	3.31±0.55bc	2.83±0.54abc
荣丰A Rongfeng-A	0.76±0.23a	1.17±0.28ab	3.14±0.52bc	4.71±0.77ab	5.16±0.66b	4.82±0.63abc	3.26±0.57bc	2.58±0.48c
泰丰A Taifeng-A	0.68±0.27a	1.12±0.22ab	3.27±0.43ab	4.72±0.39ab	4.94±0.62b	4.88±0.38abc	3.32±0.46bc	2.72±0.43bc
扬泰A Yangtai-A	0.82±0.34a	1.26±0.20ab	2.84±0.38bc	4.54±0.42b	4.94±0.48b	4.72±0.53c	3.22±0.53bc	2.63±0.55c
广恢998 R998	0.74±0.25a	1.25±0.24ab	3.27±0.43ab	4.69±0.72ab	5.12±0.54b	4.95±0.57abc	3.93±0.52bc	2.64±0.40c
广恢122 R122	0.70±0.26a	1.05±0.26b	2.71±0.32c	4.50±0.67b	5.03±0.78b	5.14±0.77abc	3.34±0.50bc	2.92±0.49abc
广恢308 R308	0.76±0.29a	1.19±0.21ab	3.07±0.59bc	4.49±0.74b	5.28±0.52b	4.72±0.50c	3.31±0.54bc	2.85±0.54abc
华占 Huazhan	0.72±0.32a	1.15±0.24ab	2.87±0.52bc	4.35±0.77b	5.16±0.35b	4.75±0.46bc	3.08±0.40c	2.48±0.45c
桂99 Gui 99	0.69±0.23a	1.10±0.20ab	3.24±0.47b	4.54±0.53b	5.48±0.82ab	4.95±0.67abc	3.47±0.87ab	2.78±0.73bc
明恢63 Minghui 63	0.73±0.23a	1.29±0.21a	3.69±0.47a	5.28±0.73a	5.93±0.73a	5.34±0.74ab	3.93±0.41a	3.26±0.27a

1) 同列数据后的不同小写字母表示不同亲本配置杂交组合间差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different hybrids derived from different parents ( $P<0.05$ , Duncan's method)

表 2 不同亲本配置杂交组合在不同移栽后天数的 SPAD 动态变化<sup>1)</sup>

Table 2 Dynamic changes of SPAD of hybrids derived from different parents on different days after transplanting

亲本 Parent	15 d	20 d	30 d	43 d	50 d	60 d	76 d	90 d
天丰A Tianfeng-A	43.08±1.27abc	41.84±1.71a	39.81±1.99a	38.57±1.67a	40.54±1.70a	41.28±1.53ab	29.84±5.50abc	18.39±4.39ab
五丰A Wufeng-A	43.75±1.17ab	41.40±1.90a	38.82±2.26a	38.21±1.52a	39.68±2.25a	39.83±1.99bcd	26.52±4.37bcd	14.69±3.61bc
荣丰A Rongfeng-A	43.41±1.27abc	42.53±1.71a	39.89±1.74a	39.12±2.09a	40.52±1.86a	41.08±1.12abc	25.36±5.03cd	16.35±7.86abc
泰丰A Taifeng-A	43.73±0.99ab	42.10±2.66a	40.63±1.99a	39.74±0.98a	40.78±0.99a	40.72±1.12abc	26.31±3.56bcd	16.91±3.18abc
扬泰A Yangtai-A	43.78±1.76ab	42.48±1.28a	39.30±1.86a	39.47±1.03a	40.69±1.21a	40.64±2.11bcd	26.80±4.18bcd	16.83±2.19abc
广恢998 R998	43.35±1.28abc	41.23±1.84a	40.18±2.14a	39.01±1.80a	40.73±1.18a	41.23±1.09ab	28.11±4.60bcd	16.52±3.55abc
广恢122 R122	44.50±1.23a	42.83±1.47a	39.98±2.04a	39.15±1.51a	40.51±1.49a	40.83±1.74abc	29.28±4.94abc	17.48±4.04ab
广恢308 R308	43.23±1.37abc	42.05±1.46a	40.06±2.06a	39.53±2.04a	40.71±0.61a	39.79±1.94bcd	22.74±2.64d	14.98±9.30bc
华占 Huazhan	43.70±1.08ab	41.99±1.30a	39.46±2.08a	38.76±2.69a	39.72±2.06a	39.35±1.94d	23.09±5.47d	12.44±3.57c
桂99 Gui 99	43.16±1.48bc	42.25±1.88a	39.78±1.99a	39.97±1.11a	39.67±2.12a	41.53±1.47a	33.26±5.50a	20.91±4.42a
明恢63 Minghui 63	42.18±1.47c	41.24±2.67a	39.21±2.13a	36.41±1.89b	36.59±4.38b	39.59±1.36cd	29.94±4.55ab	20.35±3.21a

1) 同列数据后的不同小写字母表示不同亲本配置杂交组合间差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different hybrids derived from different parents ( $P<0.05$ , Duncan's method)

合;可能与其叶片内光合物质转运缓慢或转化效率低下有关。与其相反,营养物质转化效率高的‘华占’和‘广恢308’组合,后期SPAD却显著低于其他组合。

2.1.4 透光率 透光率测定结果如图2所示。随着时间推移,群体透光率呈逐步下降趋势。前期(分蘖盛期前,移栽后20d)不同亲本来源杂交组合间透光率差异极显著( $P<0.01$ )。透光率最小的是扬泰

优组合和‘广恢998’组合,分别为26.07%和28.54%;透光率最大的为‘华占’组合,达34.23%;其他组合居中。中期(幼穗分化前,移栽后38d)各组合透光率差异不显著( $F=0.702$ ,  $P>0.05$ )。后期(抽穗扬花期,移栽后68d)各组合透光率差异显著( $F=1.882$ ,  $P<0.05$ ),‘扬泰A’组合的透光率最大,为6.38%;其次是‘广恢308’‘华占’和‘广恢122’组合;‘明恢63’组合的透光

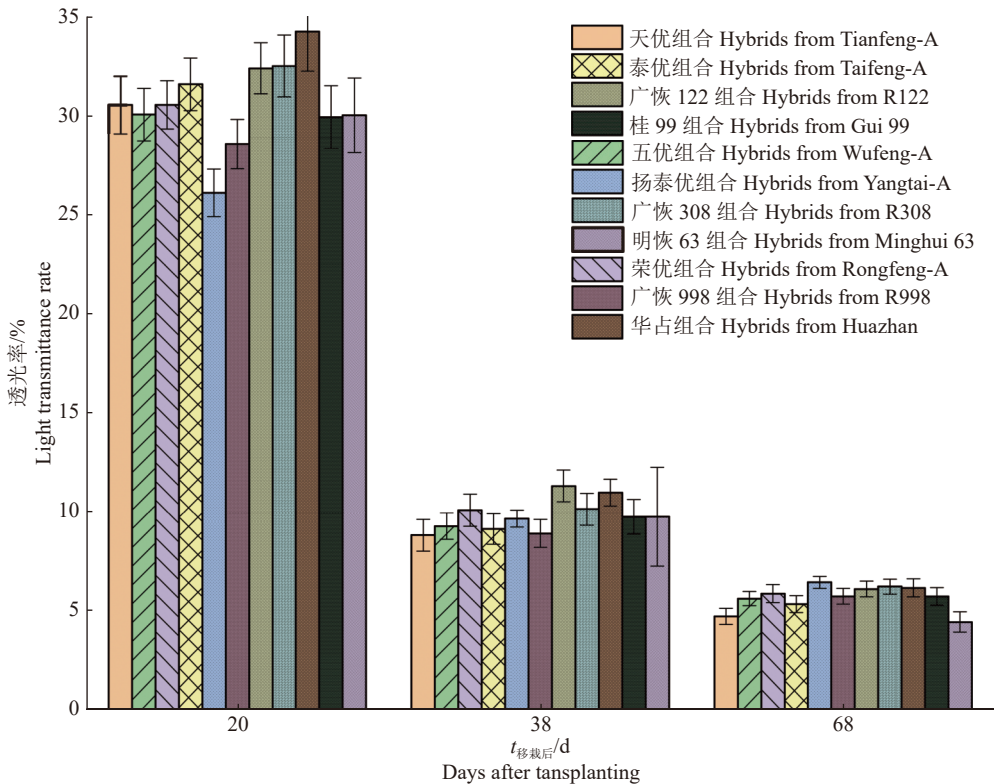


图 2 不同亲本配置杂交组合在不同移栽后天数群体透光率的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of light transmittance rate in different hybrid populations derived from different parents on different days after transplanting

率最小。特别地, ‘扬泰 A’ 组合前期透光率最低, 后期透光率最高, 与其株型有关, ‘扬泰 A’ 叶片宽大, 群体茎蘖覆盖率高, 光合面积大, 后期叶片直立上举, 群体通透性好, 光合作用强, 呼吸消耗少, 有利于其杂交组合产量提高。‘广恢 998’ ‘广恢 308’ ‘天丰 A’ 组合具有同样特性。‘明恢 63’ 组合后期透光率最低, 说明后期群体依然较为荫蔽, 通风透光性差, 呼吸消耗多, 贪青, 营养物质转化不畅顺。‘华占’ 和 ‘广恢 122’ 等组合的透光率在前中后期均处于较高水平。

## 2.2 不同亲本来源杂交组合产量性状表现

对不同亲本来源杂种  $F_1$  代的产量性状进行多重比较 (表 3), ‘明恢 63’ ‘天丰 A’ ‘桂 99’ 配置的杂种的生育期较长, 与其他组合差异显著。而扬泰优组合的生育期则显著短于其他亲本组合; 泰丰优组合单株有效穗数最多, 达 8.78, 显著高于其他组合。荣丰优、‘明恢 63’ ‘广恢 308’ 组合的单株穗数相对较少; 五丰优、‘华占’ ‘广恢 308’ ‘广恢 998’ 组合的单株实粒数较多, 而 ‘明恢 63’ ‘桂 99’ 和天丰优组合的单株实粒数较少; 结实率方面, 扬泰优、‘华占’、五丰优和荣丰优组合的结实率较高, 天丰优组合相对较低; ‘明恢 63’ ‘荣丰 A’ ‘天丰 A’ ‘扬泰 A’ 所配组合的千粒

质量较大, 显著高于其他亲本组合; 不同亲本组合的平均产量差异性不大, 扬泰优和五丰优组合的产量相对较高, 而 ‘明恢 63’ 组合的平均产量最低 (表 3)。

## 2.3 杂种后代不同发育阶段光合参数动态变化对杂种产量性状的影响

植物的光合作用通过植物各光合因子协调作用完成, 利用光能合成营养物质, 转运到籽粒中, 最终以产量的形式体现。研究不同发育阶段叶面积指数、SPAD 和透光率等参数的动态变化, 有利于了解在不同发育阶段, 这些参数对杂交水稻产量及产量性状的影响。试验分析了不同生长发育阶段的茎蘖数、叶面积指数和 SPAD 与杂种后代产量及产量性状的动态关联性, 结果见表 4。

### 2.3.1 茎蘖数与产量性状的相关性

分蘖盛期前 (移栽后 10、15、20 d) 的茎蘖数与产量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.368、0.483 和 0.388; 与单株实粒数呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与杂种结实率和千粒质量相关性不显著。此时水稻即将进入分蘖盛期, 说明前期分蘖力强、早生快发性好的杂交组合能获取高产主要通过提高单株实粒数实现。幼穗分化后期 (移栽后 50 d) 茎蘖数与产量显著负相关, 相关系数为  $-0.261$ , 与结实率极显著负

表 3 不同亲本配置杂交组合的生育期及产量性状差异性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Differences in growth stage and yield-related traits of hybrids from different parents

亲本 Parent	生育期/d Growth stage	单株穗数 Tillers per plant	单株实粒数 No. of filled grains	结实率/% Seed setting ratio	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) Grain yield
天丰A Tianfeng-A	102.8±0.46a	7.42±0.14bc	874.3±26.6de	64.35±0.72e	24.69±1.85a	6.54±0.11bc
五丰A Wufeng-A	97.94±0.55c	7.89±0.16bc	1 079.5±31.9a	74.44±1.18ab	22.64±1.38b	7.27±0.15a
荣丰A Rongfeng-A	98.78±0.45bc	7.24±0.13c	894.1±22.9cde	73.11±0.92abc	24.89±1.49a	6.76±0.13abc
泰丰A Taifeng-A	98.67±0.56bc	8.78±0.19a	981.5±25.7abc	69.45±1.06cd	22.22±0.64c	6.53±0.20bc
扬泰A Yangtai-A	95.17±0.60d	7.88±0.19bc	990.2±27.8abc	76.12±1.58a	24.36±0.49a	7.20±0.22a
广恢998 R998	99.93±0.71b	7.97±0.19b	992.8±29.3abc	71.84±1.09abc	22.81±1.59cd	6.91±0.16abc
广恢122 R122	98.93±0.63bc	7.95±0.16b	952.9±25.8bcd	70.50±1.40bcd	23.67±1.09bc	6.78±0.16abc
广恢308 R308	97.78±1.05c	7.28±0.22c	1 034.2±33.6ab	73.09±2.07abc	22.14±1.70de	7.08±0.14ab
华占 Huazhan	97.67±0.96c	7.58±0.14bc	1 051.2±41.3ab	74.47±2.42ab	21.29±1.86e	7.06±0.18ab
桂99 Gui 99	100.80±0.89ab	7.57±0.26bc	892.9±47.5cde	68.34±2.09cde	24.64±1.17b	6.82±0.27abc
明恢63 Minghui 63	104.20±0.46a	7.26±0.27c	789.1±32.8e	67.73±1.63de	26.91±1.37a	6.33±0.21c

1) 同列数据后的不同小写字母表示不同亲本配置杂交组合间差异显著( $P < 0.05$ , Duncan's法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different hybrids derived from different parents ( $P < 0.05$ , Duncan's method)

表 4 杂交后代在不同移栽后天数光合参数与产量性状的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation between photosynthetic parameters and yield-related traits of hybrid combinations on different days after transplanting

光合参数 Photosynthetic parameter	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	43 d	50 d	60 d	76 d	90 d
产量 Grain yield										
TPP	0.368**	0.483**	0.388**	-0.030	-0.012	-0.110	-0.261*	0.407**	0.531**	—
LAI	—	0.094	0.296**	—	-0.137	0.191	0.116	0.255*	-0.312**	-0.169
SPAD	—	0.294**	-0.032	—	-0.202	0.278*	0.361**	0.057	-0.339**	-0.425**
单株实粒数 No. of filled grains per plant										
TPP	0.258*	0.272*	0.267*	-0.018	0.013	-0.044	-0.099	0.524**	0.578**	—
LAI	—	0.025	0.108	—	-0.272*	-0.067	-0.025	0.063	-0.335**	-0.217*
SPAD	—	0.330**	-0.079	—	-0.169	0.291**	0.370**	-0.076	-0.401**	-0.485**
结实率 Seed setting ratio										
TPP	-0.023	0.057	-0.071	-0.150	-0.145	-0.168	-0.324**	-0.059	0.053	—
LAI	—	0.122	0.038	—	-0.120	-0.089	-0.081	-0.280**	-0.416**	-0.443**
SPAD	—	0.043	0.005	—	-0.078	0.108	0.139	0.244*	-0.453**	-0.337**
千粒质量 1 000-grain weight										
TPP	0.030	0.152	0.049	0.059	-0.002	0.013	-0.069	-0.344**	-0.376**	—
LAI	—	0.094	0.224*	—	0.301**	0.409**	0.277*	0.288**	0.278*	0.244*
SPAD	—	-0.246*	0.025	—	-0.100	-0.164	-0.198	0.164	0.300**	0.342**

1) TPP: 单株茎蘖数, LAI: 叶面积指数; “\*” “\*\*” 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平相关性显著(Pearson法); “—” 表示未获得数据

1) TPP: Tillers per plant, LAI: Leaf area index; “\*” and “\*\*” indicate significant correlations at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels respectively (Pearson method); “—” indicates no available data

相关,相关系数为-0.324。幼穗分化期茎蘖数多,说明无效分蘖消亡慢,无效分蘖过多消耗了部分营养物质,导致结实率下降,从而影响产量。杂种抽穗扬花期至灌浆结实期(移栽后 60、76 d)的茎蘖数与产量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.407 和 0.531,与单株实粒数也呈极显著正相关,相关系数分别为 0.524、0.578,而与千粒质量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.344、-0.376。此时群体分蘖处于停滞状态(图 1),其茎蘖数即为单株有效穗数。杂种后期有效穗多,千粒质量会相应减小,但单株实粒数极显著增加,从而极显著地增加杂种组合产量;单株穗数的增产作用通过提高单株实粒数来实现。

**2.3.2 叶面积指数与产量性状的相关性** 分蘖盛期前(移栽后 20 d)群体叶面积指数与产量呈极显著正相关,相关系数为 0.296,同时与千粒质量呈显著正相关,相关系数为 0.224;说明前期叶面积系数通过提高结实率使杂种产量相应提高。始穗期(移栽后 60 d)杂种群体叶面积指数与产量呈显著正相关,相关系数为 0.255,与千粒质量呈极显著正相关,相关系数为 0.288,但与结实率呈极显著负相关,相关系数为-0.280,此时群体叶面积系数增加,会一定程度上降低结实率,但能显著提高千粒质量,从而提高产量。灌浆结实期(移栽后 76 d)杂种群体叶面积指数虽然与千粒质量呈显著正相关,相关系数为 0.278,但与结实率、单株实粒数和产量极显著负相关,相关系数分别为-0.419、-0.335 和 -0.312。结果说明后期叶面积指数过高,虽然杂种千粒质量会适当增大,但其结实率和单株实粒数极显著下降,造成产量极显著减少;进一步说明,杂交稻生长后期,叶片过多,群体隐蔽,呼吸作用强,消耗过多营养,会造成杂种结实率下降,从而影响产量。

**2.3.3 SPAD 与产量性状的相关性** 分蘖前期(移栽后 15 d)杂种叶片 SPAD 与产量呈极显著正相关,相关系数为 0.294,与千粒质量显著负相关,相关系数为-0.246,与单株实粒数极显著正相关,相关系数为 0.330。此时虽然千粒质量显著减小,但极显著地增加了单株实粒数,从而达到增产的目的。幼穗分化期(移栽后 43、50 d) SPAD 与产量呈显著和极显著相关,相关系数分别为 0.278、0.361,与单株实粒数极显著正相关,相关系数分别为 0.291、0.370;说明进入幼穗分化期后,杂种叶片 SPAD 越高,单株实粒数越多,产量越高,SPAD 通过提高杂种单株实粒数来提高产量。灌浆结实期(移栽后

76、90 d)是群体 SPAD 快速下降期(表 2),杂种 SPAD 与产量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.339、-0.425,与单株实粒数和结实率呈极显著负相关,相关系数分别为-0.401、-0.485、-0.453、-0.337,但与千粒质量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.300、0.342;说明生育后期,SPAD 下降慢,植株贪青,虽然有利于籽粒充实度、千粒质量增加,但对单株实粒数和结实率存在极显著的负效应,造成减产。前人研究<sup>[33-36]</sup>也表明水稻抽穗扬花后叶片开始衰老,此时如果功能叶片 SPAD 下降慢,即 SPAD 过高,不利于光合作用产物的积累,会抑制结实率和产量的提高及稻米品质的提升。

**2.3.4 透光率与产量性状的相关性** 不同时期杂种群体透光率与产量性状的相关性见表 5。前期和中期,即分蘖盛期前和幼穗分化前期(移栽后 20、38 d),杂种群体透光率与产量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.384、-0.282,且分蘖盛期前的透光率与千粒质量显著负相关,相关系数为-0.269;说明前期和中期杂种群体透光率越大,漏光就越严重,对千粒质量和产量的影响就越大。生育后期(灌浆结实期,移栽后 68 d)群体透光率与产量相关性不显著,与千粒质量呈极显著负相关,相关系数为-0.341,与结实率呈极显著正相关,相关系数为 0.295;说明生长后期通透性好,杂种结实率显著提高,千粒质量适当减小,减产不明显。

## 2.4 光合参数与杂种产量的线性拟合

为了更好地对杂种稻产量进行早期预测和产量调控,将表 4、5 中与杂种产量呈极显著相关的光合参数与产量进行线性拟合,并作线性回归散点图,见图 3。分蘖盛期前(移栽后 10、15、20 d)杂种单株茎蘖数与产量的线性回归方程分别为 $y_{10}=0.28x+4.92$ 、 $y_{15}=0.22x+4.68$ 、 $y_{20}=0.22x+4.82$ (图 3A),相关系数分别为 0.368、0.483 和 0.388,三者的截距和斜率相近,特别地,移栽后 15 和 20 d 回归方程的斜率相同;说明分蘖盛期前利用单株茎蘖数对杂种产量进行早期预测具有较好的一致性和稳定性。同样地,分蘖期(移栽后 15 d)和幼穗分化后期(移栽后 50 d) SPAD 与产量的线性回归方程分别为 $y_{15}=0.14x+0.32$ 和 $y_{50}=0.12x+1.79$ ,相关系数分别为 0.294 和 0.361(图 3B)。分蘖期叶面积指数与产量的线性回归关系为 $y_{20}=1.02x+5.40$ ,相关系数为 0.296(图 3C);透光率与产量性状在分蘖盛期前和幼穗分化前期(移栽后 38 d)的直线回归关系分别为 $y_{20}=-4.73x+8.07$ 和 $y_{38}=-6.36x+7.23$ ,相关系数分别为-0.282 和-0.384(图 3D)。



表 5 杂种后代不同移栽后天数透光率与产量性状的相关性<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation between light transmittance rate and yield traits of hybrid progenies on different days after transplanting

$t_{\text{移栽后/d}}$ Days after transplanting	单株实粒数 No. of filled grains per plant	结实率 Seed setting ratio	千粒质量 1 000-grain weight	产量 Grain yield
20	-0.128	-0.079	-0.269*	-0.384**
38	-0.196	-0.077	-0.096	-0.282**
68	0.034	0.295**	-0.341**	-0.195

1) “\*” “\*\*” 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平差异显著 (Pearson 法)

1) “\*” and “\*\*” indicate significant differences at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels respectively (Pearson method)

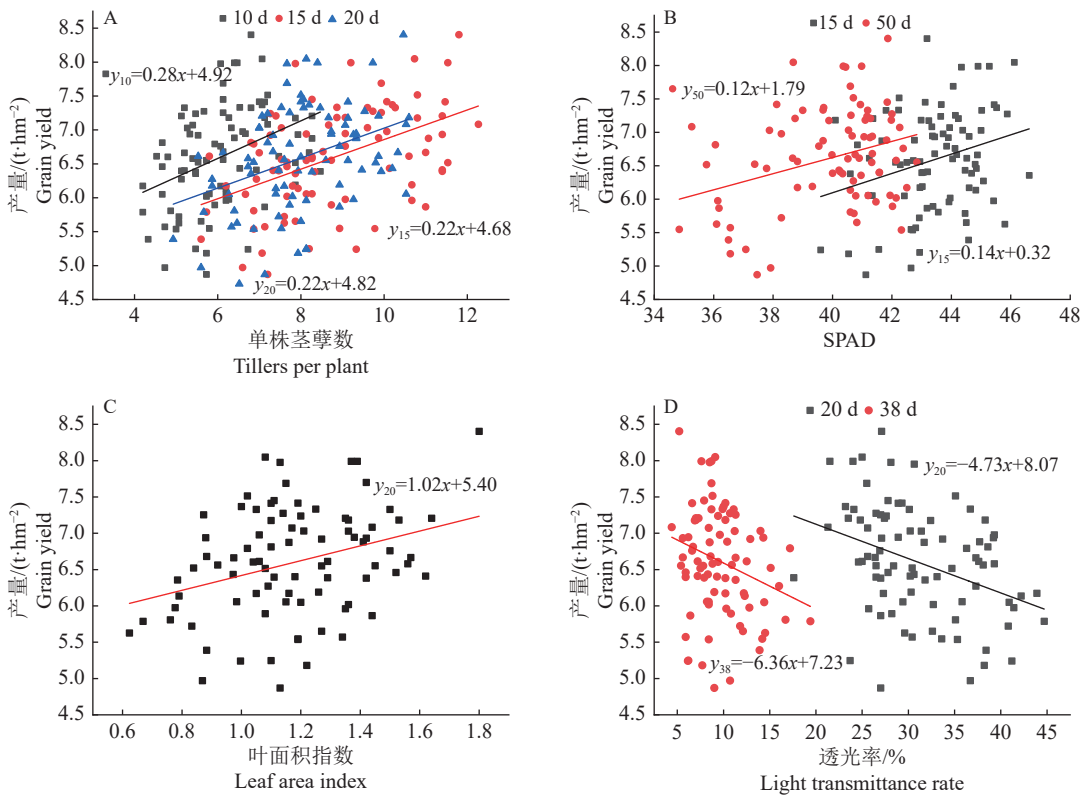


图 3 不同光合参数与杂种产量的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting of different photosynthetic parameters to hybrids' grain yield

## 2.5 光合参数之间的动态关联性分析

为了解各光合参数之间的相互关系, 将各时期的光合参数进行 Pearson 相关分析 (双尾), 结果见表 6, 利用插值法对透光率的部分数据进行估算。单株茎蘖数是群体叶面积指数的形成因素之一。除移栽后 50、76 d 外, 其他时期单株茎蘖数均与叶面积指数呈显著或极显著正相关; 说明单株茎蘖数越多, 群体叶面积指数越大。单株茎蘖数与透光率的关系则相反, 为负相关; 除幼穗分化前期 (移栽后 43 d) 和灌浆结实期 (移栽后 76 d) 相关性未达显著水平外, 其余均达到极显著水平。单株茎蘖数与 SPAD 的相关性比较紊乱, 前期 (分蘖期) 和后期 (灌浆结实期) 极显著和显著负相关, 中期相关性不强。同样, SPAD 与叶面积指数除在分

蘖后期 (移栽后 30 d)、灌浆结实期显著和极显著正相关外 (相关系数分别为 0.253、0.378), 其余阶段均相关性不强。SPAD 与透光率的关系也是这样, 除在幼穗分化前期 (移栽后 43 d) 和灌浆结实期 (移栽后 76 d) 极显著和显著负相关外 (相关系数分别为 -0.301、-0.220), 其余发育阶段均关联性不强。这种现象可能与 SPAD 自身的动态变化规律有关, 杂种叶片 SPAD 在分蘖后期至始穗期 (移栽后 30~60 d) 保持相对稳定, 即经历一段平缓期。叶面积指数与透光率的相关性则极为明显, 除移栽后 50 d 没有获得透光率数据外, 其余生长发育阶段两者均为极显著负相关。相关系数介于 -0.643~-0.340 (表 6)。二者的指数型曲线拟合方程为  $y=4.783-1.254lgx$ , 相关系数为 -0.8503, 决定系

表 6 不同移栽天数光合参数间的动态相关性分析<sup>1)</sup>

Table 6 Dynamic correlation between photosynthetic parameters on different days after transplanting

移栽天数/ d	光合参数 Photosynthetic parameter	SPAD	单株茎蘖数(TPP) Tillers per plant	透光率(LTR) Light transmittance rate
20	叶面积指数(LAI) Leaf area index	-0.054	0.456**	-0.413**
	SPAD	1	-0.359**	-0.033
	TPP		1	-0.485**
30	LAI	0.253*	0.426**	-0.340**
	SPAD	1	0.212	0.082
	TPP		1	-0.300**
43	LAI	0.010	0.224*	-0.452**
	SPAD	1	-0.061	-0.301**
	TPP		1	-0.195
50	LAI	-0.130	0.119	—
	SPAD	1	0.188	—
	TPP		1	—
60	LAI	-0.059	0.269*	-0.643**
	SPAD	1	0.183	-0.030
	TPP		1	-0.300**
76	LAI	0.378**	-0.130	-0.491**
	SPAD	1	-0.427*	-0.220*
	TPP		1	-0.166

1) “\*” “\*\*” 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平显著相关(Pearson法); “—” 表示未获得数据

1) “\*” and “\*\*” indicate significant correlations at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels respectively (Pearson method); “—” indicates no available data

数  $R^2$  为 0.723,  $y$  为叶面积指数,  $x$  为透光率 (图 4)。

### 3 讨论

#### 3.1 杂交水稻早生快发性对光合参数和产量的影响

水稻产量三要素中, 实粒数对产量的贡献最大, 有效穗通过实粒数发挥较大的间接作用<sup>[37]</sup>。分蘖力强、茎蘖数多的杂交稻组合相对于大粒大穗型组合具有较好的产量稳定性和广泛的生态适应性。丰产性与稳产性相结合是杂交稻高产育种和生产实践的最重要目标<sup>[38]</sup>。黄耀祥院士早在 1983 年就倡议进行丛生快长型水稻育种研究<sup>[39]</sup>。在季风气候的亚洲地区, 强分蘖力的水稻能够产生足够的有效穗, 在适宜的种植密度下, 其叶面积指数和产量都有较程度的提高<sup>[29]</sup>。杂交水稻在基本苗少、叶面积小一至几倍的情况下能迅速赶超常规品种, 主要原因有三点: 分蘖早而快; 茎蘖数多, 因而绿叶数多; 单叶面积大, 叶片长而宽<sup>[28]</sup>。本研究表明, 杂交

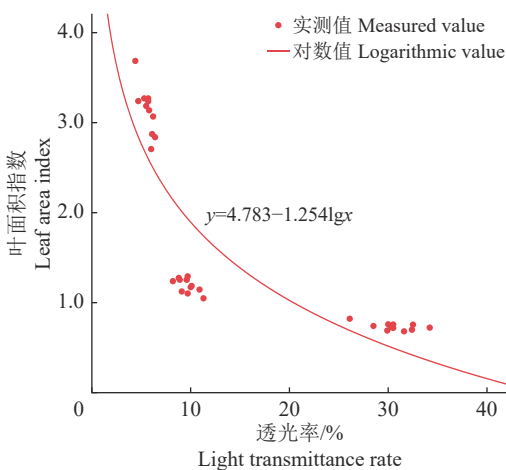


图 4 叶面积指数与透光率的相关关系

Fig. 4 Correlation between leaf area index and light transmittance rate

稻生育早期的茎蘖数与其杂种产量均极显著正相关,同时与叶面积指数极显著正相关,与透光率极显著负相关;说明分蘖力强、早生快发性好的杂交稻品种能够短时间内获得较多的茎蘖数,快速提高叶面积指数,形成强大而有效的光合冠层,减少群体透光率,增强作物对光能的截获量,提高作物生长率和群体光能利用率,最终提高作物产量。一个较为典型的反面例证就是,光合速率和光能转化效率均明显高于广东本地稻‘七桂早’和‘桂朝 2 号’的美国稻‘Lemont’,在广东种植的产量却只有当地品种的 60%~70%;原因主要是早生快发性差,分蘖弱,叶面积指数发展太慢,光能截获能力差<sup>[5]</sup>。因此,在育种实践中,应特别注重早生快发性好、分蘖力强的杂交组合的选育;这样秧苗移栽后返青快,进入分蘖时期早,茎蘖数多,后期有效穗数多,进而单株实粒数增多,产量升高。本研究中,‘天丰 A’‘五丰 A’‘广恢 998’‘广恢 308’的早生快发特性比较突出。但是,并不是所有生长发育时期的茎蘖数越多越好,研究表明,分蘖盛期至幼穗分化后期的茎蘖数与产量呈负相关,特别是幼穗分化后期的茎蘖数与产量显著负相关。如果这段时间茎蘖数较多,说明无效分蘖消亡慢,无效分蘖过多,叶面积指数过大,透光率过低,下部叶片接受阳光少,光合作用弱,呼吸作用过强,消耗部分营养物质,造成植株结实率下降,从而影响其杂种产量。另外一季中恢复系‘明恢 63’所配置的组合,在广州作晚造种植,由于生育期缩短,叶片长大垂披,虽然前期叶面积指数大,但后期转色慢,荫蔽严重,产量潜力不能发挥。因此,分蘖中后期应结合排水晒田等田间管理措施,减少无效分蘖,提高成穗率和有效穗数,达到高产稳产目的。同时,在株型上要求前期集散适中,叶片多且适度披散,以提高叶面积指数;后期株型中集,上部功能叶片挺直上举,从而有利于光能利用率的提高<sup>[32]</sup>。

### 3.2 利用光合参数对杂交水稻产量进行早期预测

水稻产量很大部分由叶片的光合作用决定<sup>[21]</sup>,林荣呈等<sup>[2]</sup>研究表明植物干质量的 90%~95% 来自其光合产物。因此对作物光合作用的研究非常重要。一方面可以了解作物光合作用的机理,包括作物对光能的吸收、传递和转换机制,从而进行氮素管控等,以提高产量、改善品质;另一方面,通过测量光合参数,分析光合参数与产量等的紧密相关程度,对作物的产量和品质进行预测评估。Ramesh 等<sup>[18]</sup>认为水稻移栽后 79 d(灌浆结实期)的 SPAD 与产量显著相关。因此可根据水稻生长发育

时期的叶片 SPAD 来对产量进行预测。段红霞等<sup>[40]</sup>分析了水稻剑叶 SPAD 和产量的变化规律以及不同时期 SPAD 与产量的关系,得出移栽后 82、89 和 96 d 的 SPAD 与水稻产量存在显著的线性关系,提出可根据水稻剑叶 SPAD 表征产量变化。黄影华等<sup>[41]</sup>通过开展不同生育期水稻品种功能与产量的相关性研究,认为在分蘖期进行水稻产量预测的效果最佳。刘彦卓等<sup>[42]</sup>、郭晓彦等<sup>[33]</sup>也认为可以通过叶片 SPAD 来预测植株最终产量。王志东等<sup>[24]</sup>、张丽等<sup>[25]</sup>研究认为 SPAD 与稻米蛋白质含量关系密切,并建立线性方程对食味品质进行评估。鲍巨松等<sup>[26]</sup>认为作物(玉米)产量与叶面积指数和透光率密切相关,两者变化规律可用二次曲线表示。本研究通过叶面积指数、SPAD、透光率等光合参数的动态变化以及它们与产量及产量性状的相关性研究,利用与杂种产量相关性极显著的光合参数作出与产量的线性回归方程,从而实现对杂种产量的早期预测,将产量的预测时间提早到移栽后的 38 d 内,处于分蘖后期至幼穗分化前期,与黄影华等<sup>[41]</sup>的结论一致。早期产量预测之所以可行,笔者认为与杂交稻的早生快发性有很大的关联性。杂交水稻一般在秧苗期就启动分蘖,茎蘖数在较短的时间内就能达到峰值。杂交稻本身叶片宽大,伴随着茎蘖数快速增多,叶面积指数急速增大,透光率快速降低,能够在较短时间内达到丰产所需要的苗架。此外,相对于中后期预测,早期预测具有更为重要的生产意义,通过早期预测能较早地发现作物生产过程中存在的问题,及时采取措施(如氮素调控等)对群体生长发育进行管控,较好地达到预期的目标产量。而在作物生长发育的中后期,植株群体基本定型,管控措施的时效性大打折扣,效果相对较差。再者,水稻等大田作物的产量受环境条件的影响较大,时间跨度大,对产量的预测难免存在偏差,此时可以利用多个光合参数进行相互验证和校正。

### 3.3 叶面积指数与透光率的相互关系

前人对光合参数间相互关系的研究相对较少。有研究曾报道水稻叶面积指数和透光率存在  $\lg LTR = -kLAI$  的指数性关系,其中  $k$  为消光指数<sup>[39]</sup>。黄耀祥等<sup>[30]</sup>的研究也表明水稻群体透光率随叶面积指数增加呈指数规律降低。本研究发现叶面积指数 ( $y$ ) 与透光率 ( $x$ ) 呈极显著负相关,二者的曲线拟合方程为  $y = 4.783 - 1.2541gx$ , 相关系数为  $-0.8503$ , 决定系数  $R^2$  为  $0.723$ , 与前期研究结果相符,且增加了一个作为截距的常数项。本研究中的决定系数不

是很大,可能与实测的透光率次数较少有关。透光率的日变化随太阳高度角的大小而变化,但不同天气对透光率的影响甚大,阴天或多云天气时透光率比晴天明显减小。即使是在典型晴天进行测量,天空中漂浮的白云或者微风轻拂都会对透光率造成较大的影响。故要全面地阐明水稻群体透光率的变化规律,应选择无风无云的典型晴朗天气,并尽量在较短时间内测量完毕。

## 4 结论

1) 茎蘖数自移栽后直线上升,于移栽后 25 d 达到峰值。此后茎蘖数逐渐减少,于始穗期(移栽后 60 d)进入平稳期。‘天丰 A’ ‘五丰 A’ ‘广恢 998’ 和 ‘广恢 308’ 组合的前期分蘖力强,茎蘖数多,叶面积指数大,早生快发性好。杂种叶片 SPAD 自移栽后缓慢下降,亦于始穗期(移栽后 60 d)后进入快速下降期。群体透光率随时间推移呈逐步下降趋势,‘扬泰 A’ ‘广恢 998’ 等组合前期透光率相对较低,后期透光率相对较高,有利于植株光合作用和产量提高。

2) 不同生长发育阶段,光合参数通过影响杂交稻不同产量性状来影响杂种产量。光合参数与杂种产量拟合的回归方程能较好地杂对杂交水稻早期产量进行预测。

3) 单株茎蘖数、叶面积指数和透光率三者的关联性较强,单株茎蘖数与叶面积指数正相关,与透光率负相关。叶面积指数 ( $y$ ) 与透光率 ( $x$ ) 负相关,二者的关系可表述为  $y=4.783-1.254lgx$ 。

**致谢:** 本研究得到钟旭华博士、傅友强博士和刘锦华同志的大力支持与帮助,诚挚感谢!

### 参考文献:

[1] 张立新,彭连伟,林荣呈,等. 光合作用研究进展与前景[J]. *中国基础科学*, 2016, 18(1): 13-20.

[2] 林荣呈,杨文强,王柏臣,等. 光合作用研究若干前沿进展与展望[J]. *中国科学*, 2021, 51(10): 1376-1384.

[3] 袁隆平. 发展超级杂交水稻保障国家粮食安全[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(3): 1-2.

[4] 屠曾平,林秀珍,蔡惟涓,等. 水稻高光效育种的再探索[J]. *植物学报*, 1995, 37(8): 641-651.

[5] 屠曾平. 水稻光合特性研究与高光效育种[J]. *中国农业科学*, 1997, 30(3): 28-35.

[6] MARENCO R A, ANTEZANA-VERA S A, NASCIMENTO H C S. Relationship between specific leaf area, leaf thickness, leaf water content and SPAD-502 readings in six amazonian tree species[J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(2): 184-190.

[7] 李媛媛,常庆瑞,刘秀英,等. 基于高光谱和 BP 神经网络

的玉米叶片 SPAD 值遥感估算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 135-142.

- [8] 李杰,冯跃华,麻井彪,等. 2 个超级杂交水稻剑叶主脉两侧 SPAD 值的差异表现[J]. *核农学报*, 2017, 31(4): 777-786.
- [9] UDDLING J, GELANG-ALFREDSSON J, PIKKI K, et al. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings [J]. *Photosynthesis Research*, 2007, 91(1): 37-46.
- [10] LEÓN A P, VIÑA S Z, FREZZA D. Estimation of chlorophyll contents by correlations between SPAD-502 meter and chromameter in butterhead lettuce[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(19): 2877-2885.
- [11] 李杰,冯跃华,王旭,等. 不同地力和施氮水平下水稻叶片 SPAD 值及产量的分析[J]. *中国稻米*, 2017, 23(1): 26-30.
- [12] YANG W H, PENG S B, HUANG J L, et al. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(1): 212-217.
- [13] YANG H, YANG J, LV Y, et al. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status[J]. *Plant Production Science*, 2014, 17(1): 81-92.
- [14] PENG S, GARCIA F V, LAZA R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(2/3): 243-252.
- [15] HAWKINS J A, SAWYER J E, BARKER D W, et al. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(4): 1034-1040.
- [16] 赵士诚,何萍,仇少君,等. 相对 SPAD 值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1091-1098.
- [17] 朱寒,时元智,洪大林,等. 水肥调控对水稻叶片 SPAD 值与产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2019(11): 50-53.
- [18] RAMESH K, CHANDRASEKARAN B, BALASUBRAMANIAN T N, et al. Chlorophyll dynamics in rice (*Oryza sativa*) before and after flowering based on SPAD meter monitoring and its relation with grain yield[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2002, 188(2): 102-105.
- [19] 于亚利,贾文凯,王春宏,等. 春玉米叶片 SPAD 值与氮含量及产量的相关性研究[J]. *玉米科学*, 2011, 19(4): 89-92.
- [20] MONOSTORI I, ÁRENDÁS T, HOFFMAN B, et al. Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat[J]. *Euphytica*, 2016, 211(1): 103-112.
- [21] 欧阳杰,王楚桃,何光华,等. 水稻灌浆中后期功能叶中叶绿素含量及其变化趋势与谷物产量关系研究[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(4): 1201-1204.
- [22] LE BAIL M, JEUFFROY M H, BOUCHARD C, et al. Is



- it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements?[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23(4): 379-391.
- [23] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 123-132.
- [24] 王志东, 陈宜波, 龚蓉, 等. 优质籼稻剑叶 SPAD 值与稻米品质相关性研究[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(1): 89-97.
- [25] 张丽, 张中东, 陶宏斌, 等. 利用玉米叶片 SPAD 值预测子粒蛋白质含量分析[J]. *玉米科学*, 2014, 22(6): 74-79.
- [26] 鲍巨松, 薛吉全, 杨成书, 等. 不同株型玉米叶面积系数和群体受光态势与产量的关系[J]. *玉米科学*, 1993, 1(3): 50-54.
- [27] 孙锐, 朱平, 王志敏, 等. 春玉米叶面积系数动态特征的密度效应[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1097-1105.
- [28] 黄仲青. 杂交水稻光合性能的探讨[J]. *安徽农学院学报*, 1980(1): 8-13.
- [29] DE DATTA S K, 唐建军. 分蘖力和叶面积系数对产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 1985(2): 61-62.
- [30] 黄耀祥, 张旭, 林道宣, 等. 水稻不同类型品种产量构成因素及其群体内透光率差异的研究[J]. *广东农业科学*, 1986, 13(4): 6-8.
- [31] 丁颖. *中国水稻栽培学*[M]. 北京: 农业出版社, 1961.
- [32] 王丰, 廖亦龙, 柳武革, 等. 籼型杂交稻恢复系动态株型与光能利用率评价[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(2): 141-154.
- [33] 郭晓彦, 陈雪青, 史鹏飞, 等. 施用新型尿素水稻叶片 SPAD 值变化特征及产量分析[J]. *天津农业科学*, 2018, 24(5): 51-54.
- [34] WANG Y W, XU C, LV C F. Chlorophyll *a* fluorescence analysis of high-yield rice (*Oryza sativa* L.) LYPJ during leaf senescence[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(3): 422-429.
- [35] 翟荣荣, 冯跃, 曹立勇, 等. 水稻叶片衰老研究进展[J]. *中国稻米*, 2011, 17(1): 7-12.
- [36] 李可, 禹晴, 徐云姬, 等. 水稻叶片早衰突变体的农艺与生理性状研究进展[J]. *中国水稻科学*, 2020, 34(2): 104-114.
- [37] 杨行海, 吴艳艳, 陈辉云, 等. 广西早籼早熟杂交水稻产量与主要经济性状的分析[J]. *种子*, 2011, 30(6): 85-87.
- [38] 杨振玉, 张忠旭, 高勇, 等. 偏高秆偏大穗粳爪交组合的选育路线、高产生理基础及其栽培体系[J]. *杂交水稻*, 1996(6): 5-7.
- [39] 黄耀祥, 陈顺佳, 陈金灿, 等. 水稻丛化育种[J]. *广东农业科学*, 1983, 10(1): 1-6.
- [40] 段红霞, 夏桂龙, 欧阳建平, 等. 赣东北不同施肥模式下晚稻剑叶的 SPAD 值变化及其与产量的关系[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(6): 16-18.
- [41] 黄影华, 张华杰, 陈秋玉, 等. 不同生育期水稻叶片 SPAD 值与产量相关性研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2021, 34(1): 1-7.
- [42] 刘彦卓, 黄农荣, 黄秋妹, 等. 晚季不同类型高产水稻品种光合速率和叶绿素含量变化研究初报[J]. *广东农业科学*, 2000, 27(1): 2-4.

【责任编辑 李庆玲】